



NOVÉ ZKUŠENOSTI A POZNATKY Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ ADHEZE NA ZKUŠEBNÍM STAVU

NEW EXPERIENCE AND RESULTS FROM EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF ADHESION ON A ROLLER RIG

Petr VOLTR¹, Abdulkadir ZIREK², Bekir Tuna KAYAALP³

Abstrakt

Článek se věnuje aktuálním pokrokům v experimentálním výzkumu adheze kolo–kolejnice na zkušebním stavu v plném měřítku. Na zkušebním stavu byla zavedena bezdemontážní reprofilace kola a kladky, byl vyvinut nový měřicí a řídicí software, rozšířily se možnosti úpravy adhezních podmínek. Jako příklad nových výstupů jsou představeny výsledky měření adhezních charakteristik v podmínkách povrchů suchých, mokrých a znečištěných plastickým mazivem.

Klíčová slova

adheze, kladkový stav, kontakt kolo–kolejnice, tření

Abstract

The article presents current advancements in experimental research of wheel–rail adhesion on a full-scale roller rig. On-site reprofiling of the wheel and roller has been implemented, new measurement and control software has been developed and the possibilities of influencing the adhesion conditions have been extended. Out of the new outputs, results of measurement of creep curves in dry, watered and grease-lubricated conditions are chosen for presentation.

Keywords

adhesion, friction, roller rig, wheel–rail contact

1 ÚVOD

Adheze kolejového vozidla představuje schopnost přenášet tečné silové účinky v místech dotyku kol a kolejnic, aniž musí nutně dojít k prokluzu. Popis zákonitostí, jimiž se adhezní přenos sil řídí, má pro teorii, provoz a konstrukci značný význam. Jejich výzkum je předmětem mnoha prací, z nichž některé jsou založeny na teorii kontaktní mechaniky, jiné vycházejí vyloženě z experimentů a pozorování, ale všechny v souhrnu popisují jeden soubor fyzikálních jevů. V tomto příspěvku referujeme o aktuálním postupu na Dopravní fakultě Jana Pernera v této oblasti, přičemž pozornost věnujeme práci experimentální, kde byly v posledních letech rozšířeny možnosti zkušebního zařízení a výzkumná činnost postoupila k mezinárodní spolupráci.

¹ Ing. Petr Voltr, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice. Tel.: +420 466 038 520, e-mail: petr.voltr@upce.cz

² Ing. Abdulkadir Zirek, University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Studentská 95, 532 10 Pardubice. E-mail: abdulcadir.zirek@student.upce.cz

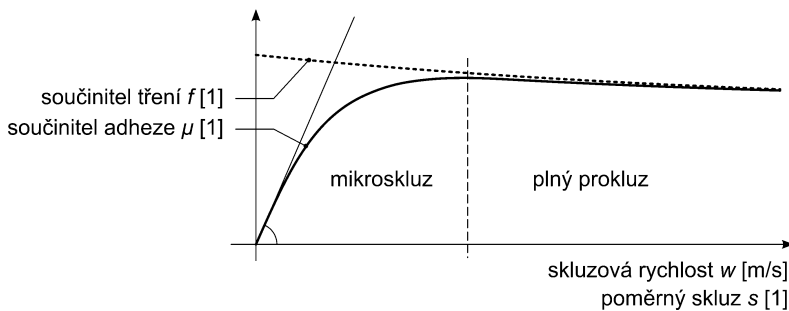
³ Ing. Bekir Tuna Kayaalp, dtto. E-mail: bekir.kayaalp@student.upce.cz

2 TEORIE A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Teorie adhezního kontaktu kola a kolejnice je založena na poddajnosti ocelového materiálu (včetně případné mezilehlé vrstvy) a tření stýkajících se povrchů. Účinkem normálového zatížení se mezi kolem a kolejnicí utváří dotyková ploška, v níž je rozloženo normálové i tečné napětí. Vlivem tečného účinku se tělesa smykově deformují, což se na pohybu kola projeví přítomností skluzu. Na mezi dané součinitelem tření se schopnost přenosu tečné síly nasycuje, vzniká plný prokluz a hovoří se o mezi adheze.

Ucelené teorie, jež vedou k fyzikálnímu a matematickému popisu těchto jevů, jsou spojeny se jmény Cartera [1], Kalkera [2], Freibauera [3], Polácha [4] a dalších. Jeden z možných popisů má podobu *adhezní* neboli *skluzové charakteristiky*, což je závislost tečné síly nebo součinitele adheze na skluzu nebo skluzové rychlosti (viz obr. 1). Není to popis vyčerpávající, avšak je výhodný pro výpočetní použití i pro názornost výkladu. Spojení s experimentálním výzkumem většinou spočívá v takovém řízení experimentu, že je zaznamenána adhezní charakteristika za určitých podmínek nebo její část.

Možnosti experimentálního vybavení byly shrnuty v [5]. Lze využít zařízení ve zmenšeném či plném měřítku, v laboratoři či na železniční trati. Zařízení malého měřítku mají výhodu v přesném řízení podmínek zkoušky, nenáročnosti a nižších nákladech provozu, zatímco při nezmenšeném měřítku rozměrů a sil jsou lépe reprezentovány podmínky skutečného železničního provozu.



Obr. 1 Náčrt typické adhezní charakteristiky

3 KLADKOVÝ STAV V PLNÉM MĚŘÍTKU

3.1 Mechanická konstrukce a pohon

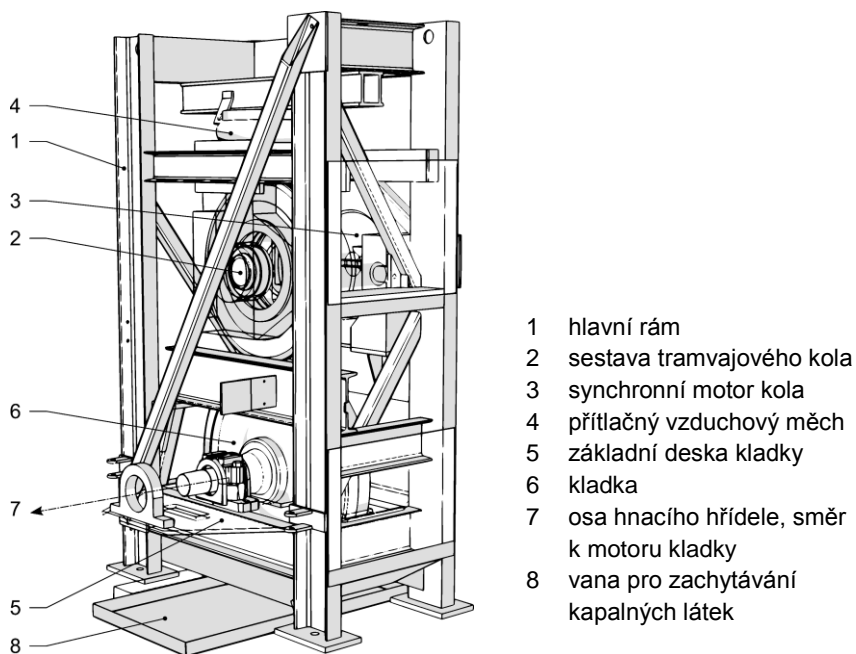
Pro studium adhezních jevů se na Dopravní fakultě Jana Pernera využívá *zkušební stav tramvajového kola*, který byl vybudován Výzkumným ústavem kolejových vozidel (VÚKV a.s.) za účelem testování přímého pohonu nezávisle otáčivého kola tramvajového vozidla a nyní se nachází v suterénní laboratoři Výukového a výzkumného centra v dopravě DFJP.

Základem stroje (viz obr. 2) je hlavní rám, v němž jsou nad sebou uspořádána dvě zkušební tělesa – kolo a kladka (rotující kolejnice). Kladka je ložiskována na základní desce, kterou lze natáčet do úhlu náběhu, a je spojena kloubovým hřídelem s asynchronním motorem uloženým zvláště na podlaze laboratoře. Tramvajové kolo je uchyceno v kyvném rameni, hnáno přes homokinetický kloub synchronním motorem a přitlačováno ke kladce vzduchovým měchem. Podrobnější popis je uveden v předcházejících publikacích, např. [6].

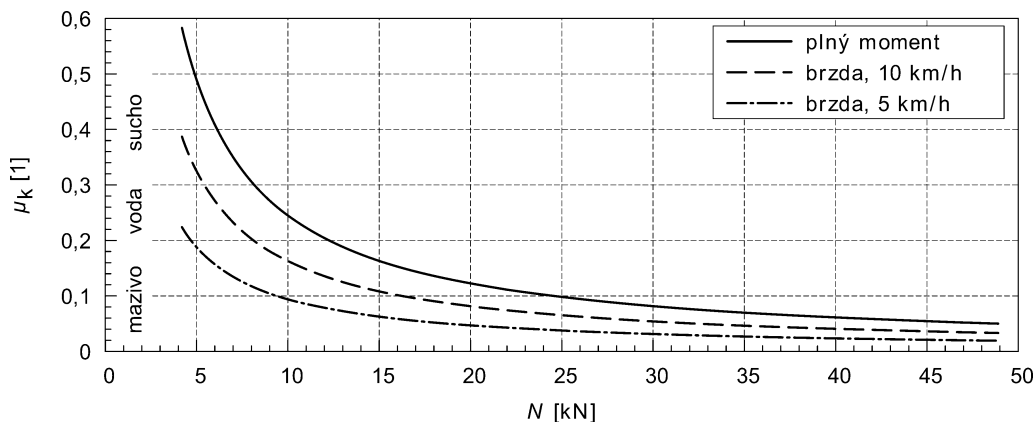
Jak jsme dříve zdůrazňovali [5], hlavní omezení provozních režimů kladkového stavu se dvěma motory spočívá v možnosti dostat kolo do prokluzu. Maximální moment motoru kola M_1 , kterýžto se při zkoušce zadává, je roven 852 Nm a na obvodu kola o průměru $r_1 = 696$ mm tudíž představuje sílu $T_1 \approx 2450$ N. Vyjádřením v poměru k přitlačné (normálové) síle N dostáváme

$$\mu_k = \frac{T_1}{N} = \frac{M_1}{r_1 \cdot N}, \quad (1)$$

maximální dosažitelný součinitel adheze s ohledem na pohon kola – graf této funkce je zakreslen na obrázku 3. Je-li motor kladky schopen vyvinout stejný účinek, pak lze kontakt takto zatížit a při tom udržet konstantní rychlost kladky. Zkušenost ukazuje, že motor toho je schopen s výjimkou nízkých otáček v režimu trakce kladky (brzdy kola), kde dosažitelný moment klesá. Podstatné ale ještě je, že pokud je μ_k větší než maximální součinitel adheze daný stavem povrchů, lze vyvodit plný prokluz (tedy dosáhnout vysoké hodnoty poměrného skluzu) a zaznamenat celou adhezní charakteristiku. V opačném případě jsme omezeni na část vzestupné větve a nezískáváme úplné informace.



Obr. 2 Model zkušebního stavu tramvajového kola

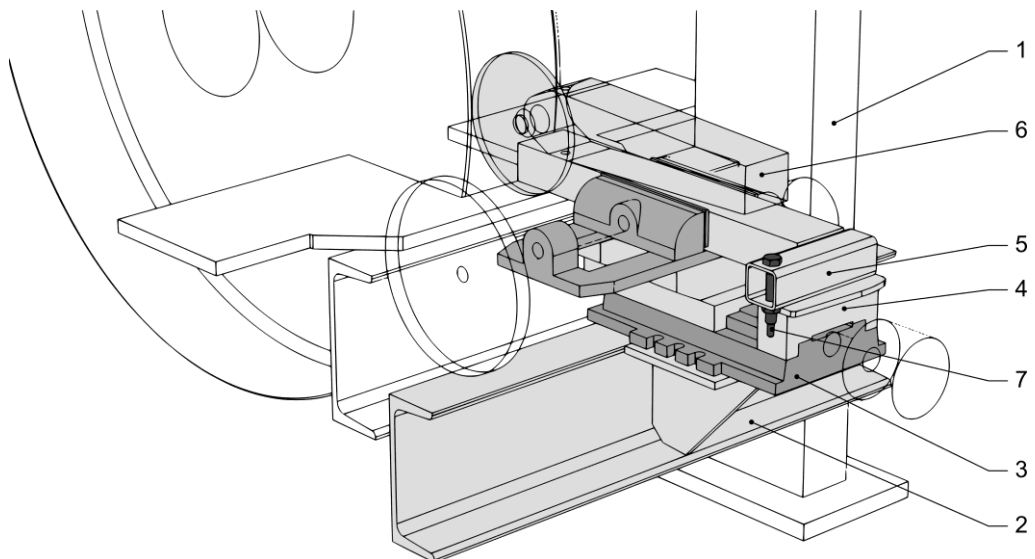


Obr. 3 Graf součinitele adheze dosažitelného vzhledem k momentu motoru kola a přítlačné síle

3.2 Řízení a dokumentace geometrických podmínek kontaktu

Kontaktní podmínky na zkušebním stavu zahrnují geometrii stýkajících se těles, z níž zase podstatnou součástí jsou příčné profily kola a kladky. Opotřebením, které je nevyhnutelným důsledkem provozu, se profily mění – tvarově se přizpůsobují, vzniká široká dotyková oblast s menším kontaktním tlakem. Kromě toho mohou vzniknout povrchové vady či nerovnoměrné opotřebením, vedoucí ke zvýšenému hluku a dynamickým účinkům. Tak jako u kolejových vozidel lze i kola zkušebního zařízení reprofilovat soustružením, což však vyžaduje pracné a nákladné operace. Proto bylo zavedeno tvarové broušení profilů přímo na zkušebním stavu.

Východiskem je přípravek pro broušení obvodové plochy kladky jiného zkušebního zařízení na DFJP, jež však je v celém rozsahu válcová. Tento přípravek sestává z křížového svěráku, který se připevní na příčník rámu stroje a v němž je uchycena ruční bruska. Pro přebroušování obecných profilů bylo toto zařízení (viz obr. 4) doplněno držákem s vyčnívajícím trnem, který omezuje úběr materiálu bruskou podle šablony profilu. Broušící přípravek se připevňuje šroubovými spoji do úrovně toho zkušebního tělesa, které je zrovna třeba brousit, a lze jím obnovit profily bez demontáže zkušebních těles.



Obr. 4 Model přípravku pro broušení jízdních obrysů na zkušebním stavu: 1 – rám stroje, 2 – odnímatelný příčník, 3 – křížový svěrák, 4 – nastavitelná opěra se šablonou profilu, 5 – držák brusky, 6 – ruční úhlová bruska, 7 – kopírovací trn

Přesnost tohoto jednoduchého zařízení je omezena šířkou a tvarem profilu brusného kotouče, průměrem kopírovacího čepu, vůlemi ve vedení, poddajností částí přípravků apod. a v neposlední řadě zručností a svědomitostí obsluhy. Naměřenou odchylku od jmenovitého tvaru v mezích $\pm 0,2$ mm v radiálním směru hodnotíme jako dobrou.

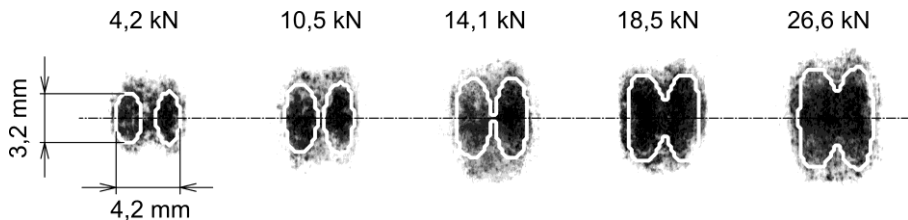
Návrhem profilu kola či kladky lze řídit geometrické podmínky kontaktu prostřednictvím příčných poloměrů křivosti. Rozborem naměřených profilů se však ukazuje, že pro dosažení dobré přesnosti poloměru křivosti by bylo zapotřebí přesnost radiální souřadnice ještě podstatně zvýšit. Na přesnou geometrii se tudíž nelze spolehnout, nelze ji přesně řídit; lze ji však dobře dokumentovat, takže to nepředstavuje významnou nevýhodu.

Po obnově jízdních ploch nebo po delší době zkoušek dokumentujeme kontaktní geometrii bezkontaktním měřením profilů. Naměřená data pro obě tělesa (z_1 , z_2) se zpracují a při známé vzájemné příčné poloze se připraví funkce vzdálenosti

$$h(y) = z_1(y) - z_2(y), \quad (2)$$

kteřá se použije jako vstup pro řešení polohertzovského kontaktu v programu Contact [7]. Výsledkem je dotyková ploška a rozložení normálového napětí, čímž jsou dokumentovány podmínky normálového kontaktu. Lze i výpočetně určit teoretickou adhezni charakteristiku, což dává možnost porovnávání počátečních strmostí i při neeliptickém kontaktu.

Vypočtená dotyková oblast se porovnává s otiskem na uhlový papír, viz obr. 5. Tyto otisky se pořizují i v kratších intervalech během experimentální činnosti, a ukáže-li se významná změna, značí to, že je třeba profily přeměřit nebo přebrousit.



Obr. 5 Ukázka dokumentace dotykové plošky na zkušební zařízení – podkladem je otisk přes uhlový papír, bílé ohraničení značí výsledek výpočtu z naměřených profilů

3.3 Řízení a dokumentace adhezni podmínek

Při experimentech popisovaných v předcházejících publikacích (naposledy [8]) byly jízdní plochy kola a kladky suché a čisté, nebo znečištěné olejem. Olej je schopen výrazného zhoršení adheze, dobře lpí na površích, nevyžaduje průběžnou aplikaci a málo odstříkuje. Od té doby byly však zkoušeny i jiné znečišťující látky.

Za tím účelem byl zkušební stav vybaven odnímatelnými plexisklovými kryty, na něž ve spodní části navazují nerezové okapy a mělká vana pro jímání upotřebených látek; hlubší nádrž s odvodem nelze bez zásahu do stavebních konstrukcí instalovat. V uplynulé době byly prováděny zejména experimenty s průběžným přívodem čisté vody, pro něž byla využita různá dočasně sestavená zařízení. Nakonec však bylo takové zařízení vytvořeno trvale, s jednoduchým přívodem vody samotíží z nádrže. Průtok se řídí otevřením ručního ventilu. Voda proudí nebo odkapává na jízdní plochu rotující kolejničky několik centimetrů před vstupem do kontaktu.

Voda byla při některých zkouškách doplněna směsí oxidů železa v práškové formě, což reprezentuje částice opotřebení přirozeně přítomné v železničním provozu. V rámci práce [9] byl na zkušební stavu tramvajového kola pozorován i jev, kdy jisté množství vody s oxidy železa tvoří poměrně viskózní vrstvu, která vede k výraznému zhoršení adhezni podmínek.

Dále byly zaznamenávány adhezni charakteristiky ovlivněné prostředky na mytí nádobí („jar“, angl. „fairly liquid“), jež se sice v provozu na kolejničkách běžně nevyskytují, ale v adhezni výzkumu jsou oblíbeným prostředkem snadného zhoršení adheze. Testován byl i vliv rostlinného materiálu v podobě mokré či zaschlé kaše z listí, která naopak je v železničním provozu významným přírodním činitelem, jenž dokáže adhezni podmínky podstatně zhoršit.

3.4 Měřicí a řídicí systém

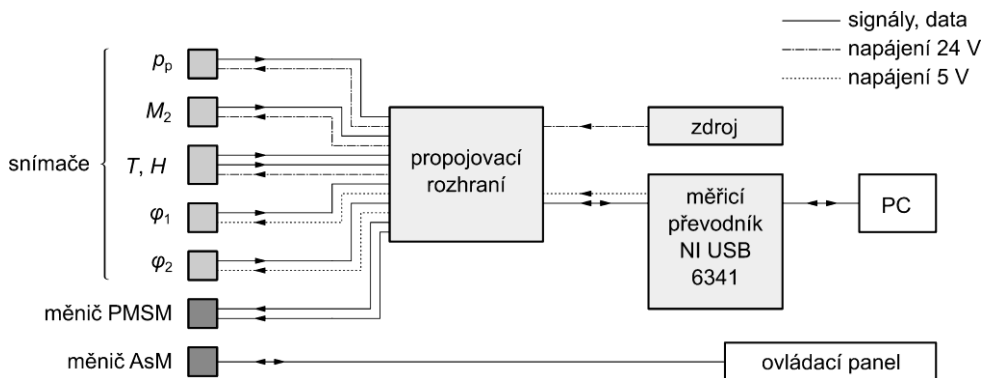
Nově zřízený měřicí řetězec je z větší části shodný s dřívějším provedením. Podélná tečná síla v kontaktu T se zjišťuje přepočtem ze snímače momentu na hřídeli kladky M_2 . Rychlost otáčení kladky se při experimentu mění jen velmi málo, takže setrvačné jevy lze při přepočtu zanedbat. Součinitel adheze μ se stanoví podílem tečné a normálové síly, přičemž pro měření normálové síly byl doplněn snímač tlaku v přítlačné vzduchové pružině p_p . Kalibrace měřicího řetězce pro obě síly byla provedena pomocí tenzometrického siloměru HBM a potřebných přípravků.

Skruz se odvozuje z otáček kola a rotující kolejničky, jež se zjišťují numerickou derivací výstupu z čítačů, na něž jsou napojeny dva rotační enkodéry (φ_1 , φ_2). Pro dokumentaci podmínek zkoušky

se měří teplota a relativní vlhkost vzduchu v prostoru stroje (T, H). Všechny snímače jsou zapojeny do měřicího A/D a D/A převodníku výrobce National Instruments, který komunikuje s počítačem přes rozhraní USB. Schéma zapojení je na obr. 6.

Podstatného vylepšení doznalo softwarové vybavení, jež bylo vyvinuto v prostředí Delphi s využitím knihoven NI-DAQmx od výrobce měřicího převodníku. Program přijímá měřená data a zobrazuje je v grafickém rozhraní na obrazovce, a to nejen v číselné podobě, ale i jako průběžně vykreslovanou adhezní charakteristiku. Díky tomu má obsluha velmi dobrý přehled o aktuálních podmínkách a průběžných výsledcích, zatímco dříve se teprve při vyhodnocení dat ukázalo, jaké jevy se vlastně odehrávaly.

Ze stejného programu lze ovládat i motor kola. Snadno se tak zadá lineární rampa nárůstu a poklesu momentu motoru M_1 , doplněná o automatickou protiskluzovou a protismykovou ochranu, jež sama ukončí prokluz při dosažení zadané mezní hodnoty a odstraňuje riziko vzniku plošek při zkouškách v režimu brzdy.



Obr. 6 Schéma měřicího řetězce zkušebního stavu tramvajového kola v aktuální konfiguraci

4 VÝSLEDKY VYBRANÝCH EXPERIMENTŮ

Z experimentů provedených v uplynulém období vybíráme sadu měření, jejichž účelem bylo zmapovat vliv dvou různých způsobů zhoršení adhezních podmínek – kontinuálním přívodem menšího množství vody a jednorázovou aplikací plastického maziva. Experimenty proběhly v rámci nově zavedeného praktického předmětu v doktorském studiu oboru Dopravní prostředky a infrastruktura.

4.1 Zkušební podmínky

Při měření adhezních charakteristik je rychlost otáčení kladky téměř konstantní (v rámci sklonu charakteristiky asynchronního motoru). Zkoušky byly prováděny při obvodových rychlostech kladky 5, 10, 20 a 40 km/h. Přítlačná vzduchová pružina byla bez tlaku, takže normálová síla v kontaktu měla hodnotu přibližně 4,25 kN – nízký přítlak byl zvolen proto, aby i za zcela suchých podmínek byl pohon schopen vyvodit plný prokluz (srv. obr. 3).

Adhezní podmínky byly následující:

1. **suchý, čistý stav** – mechanicky očištěno, odmaštěno acetonem,
2. **mokrý povrch** – průběžný přívod vody s průtokem 4,35 ml/s,
3. **masné povrchy** – plastické mazivo nanášeno před zkouškou.

Profily kola a kolejnice byly opotřebené, s neeliptickou, nesouvislou dotykovou ploškou podobně jako na obr. 5. Podle polohertzovského výpočtu v programu Contact [7] byl maximální tlak p_{\max} v kontaktu kolem 900 MPa, střední tlak p_s přibližně poloviční (neshoduje se s hertzovským

kontaktem – tam je $p_s = 2/3 p_{\max}$). Pro každý ze tří stavů povrchů a každý ze čtyř stupňů nastavení rychlosti byla provedena série měření zahrnující alespoň pět adhezních charakteristik.

4.2 Výsledky

Adhezní charakteristiky za sucha jsou podle očekávání nejnižší položené, s maximálním součinitelem přibližně $\mu_{\max} = 0,4$, kterážto hodnota v tomto pásmu rychlostí ještě nijak zásadně nezávisí na rychlosti jízdy (tj. obvodové rychlosti kladky). Pokles adhezní charakteristiky $\mu(s)$ za vrcholem je pro vyšší rychlosti výraznější, což je dáno prostě tím, že součinitel tření ve své podstatě závisí na absolutní skluzové rychlosti w , nikoli relativním skluzu s .

Přívod vody snižuje vrcholy adhezních charakteristik k hodnotám kolem 0,25–0,3, které s narůstající rychlostí spíše klesají. Množství přiváděné kapaliny hodnotíme jako spíše větší, dostatečně zásobující kontakt čistou vodou; v jiných experimentech [9] jsme testovali řádově menší průtoky, které v kombinaci s částicemi opotřebením vedly k výraznějšímu snížení adheze (známý jev z praxe – vlhké kolejnice jsou horší než silný déšť). Nutno doplnit, že zde pozorujeme při skluzových rychlostech $w \geq 0,5\text{--}1$ m/s nástup čistícího vlivu, který zvyšuje dosažitelný součinitel adheze zase až téměř k suchým úrovním.

V případě znečištění jízdnicích ploch mazivem klesá maximální součinitel adheze pod 0,1 a v režimu prokluzu má adhezní charakteristika jen nevýrazný pokles, což souhlasí s dosavadními poznatky. Výsledky týkající se maximálního součinitele adheze jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 Výsledky adhezních měření – průměrné hodnoty maximálního součinitele adheze μ_{\max} pro každou sadu

	stav povrchů		
	suchý	voda	mazivo
	μ_{\max} [1]	μ_{\max} [1]	μ_{\max} [1]
5 km/h	0,39	0,29	0,07
10 km/h	0,40	0,27	0,09
20 km/h	0,40	0,26	0,09
40 km/h	0,41	0,25	0,08

Kromě maximálního součinitele adheze a průběhu adhezní charakteristiky v prokluzu je však důležitá ještě počáteční strmost vzestupné větve $c_{\mu s0} = d\mu/ds(0)$ – k teorii a shrnutí dřívějších experimentů viz např. [10]. Pro suché povrchy vychází odečtením z grafu $c_{\mu s0} \approx 155\text{--}175$. Při horších adhezních podmínkách se obecně očekávají nižší hodnoty. Vidíme však, že je-li adheze zhoršena jen vodou, počáteční strmost klesá jen nepatrně ($c_{\mu s0} \approx 145\text{--}160$). Teprve při znečištění mazacím tukem je strmost adhezní charakteristiky alespoň třikrát menší. Na základě těchto výsledků již odpadají pochybnosti k adhezním charakteristikám z článku [11], kde nacházíme dvojice křivek s výrazně odlišnými maximy, ale stejnou počáteční strmostí. Jev poklesu strmosti pro horší adhezní podmínky platí – fyzikální podstatou je vytvoření poddajné mezivrstvy nečistot – avšak samotná čistá voda takovou vrstvu nevytváří, a tudíž nevede k výrazné redukci hodnoty $c_{\mu s0}$.

Lze objasnit [4], že vhodnější než posuzovat hodnotu $c_{\mu s0}$ jako takovou, je zabývat se redukčním součinitelem, jímž se násobí strmost teoretická pro čistá a hladká ocelová tělesa. K tomu je však třeba znát velikost a tvar dotykové plošky a kontaktní tlak. Bylo řečeno, že v našich experimentech byl kontakt nehertzovský; nelze tak jednoduše použít Kalkerovu lineární teorii. Na základě modelování adhezní charakteristiky v softwaru Contact ale lze říci, že teoretická strmost by pro dané kontaktní podmínky měla být $c_{\mu s0, \text{teor.}} = 304$. Redukční součinitel

$$k_{\text{red}} = \frac{c_{\mu s0}}{c_{\mu s0, \text{teor.}}} \quad (3)$$

pak vychází pro suché povrchy 0,5–0,6, pro mokré povrchy kolem 0,5. To jsou poněkud menší hodnoty, než se uvádí v [4] podle měření na lokomotivách a v [12] podle laboratorních zkoušek, ale lze je považovat za reálné. Příčinou rozdílů mohou být zkušební podmínky (množství vody, drsnost povrchů) nebo nepřesnost našeho výpočtu dotykové plochy. Pro olej je z našich experimentů $k_{red} \approx 0,15$. Shrnutí výsledků týkajících se počáteční strmosti adhezní charakteristiky je provedeno v tabulce 2. Soubory hodnocených adhezních charakteristik jsou vykresleny na obrázku 7.

Tab. 2 Výsledky adhezních měření – strmost vzestupné větve adhezní charakteristiky $c_{\mu s0}$ a redukční faktor k_{red} (pozn.: symbol * značí výsledek z měření na vozidle, kde ovlivnění adhezních podmínek mohlo zahrnovat přírodní vlivy, a tudíž nemusí být zcela srovnatelné s laboratorními experimenty s čistou vodou)

		stav povrchů					
		suchý		voda		mazivo	
		$c_{\mu s0}$ [1]	k_{red} [1]	$c_{\mu s0}$ [1]	k_{red} [1]	$c_{\mu s0}$ [1]	k_{red} [1]
naše měření	5 km/h	155	0,51	150	0,49	43	0,14
	10 km/h	170	0,56	160	0,53	50	0,16
	20 km/h	175	0,58	145	0,48	45	0,15
	40 km/h	175	0,58	150	0,49	40	0,13
podle [4]			0,70		*0,20		
podle [12], min.			0,67		0,59		0,08
podle [12], max.			0,78		0,62		0,08

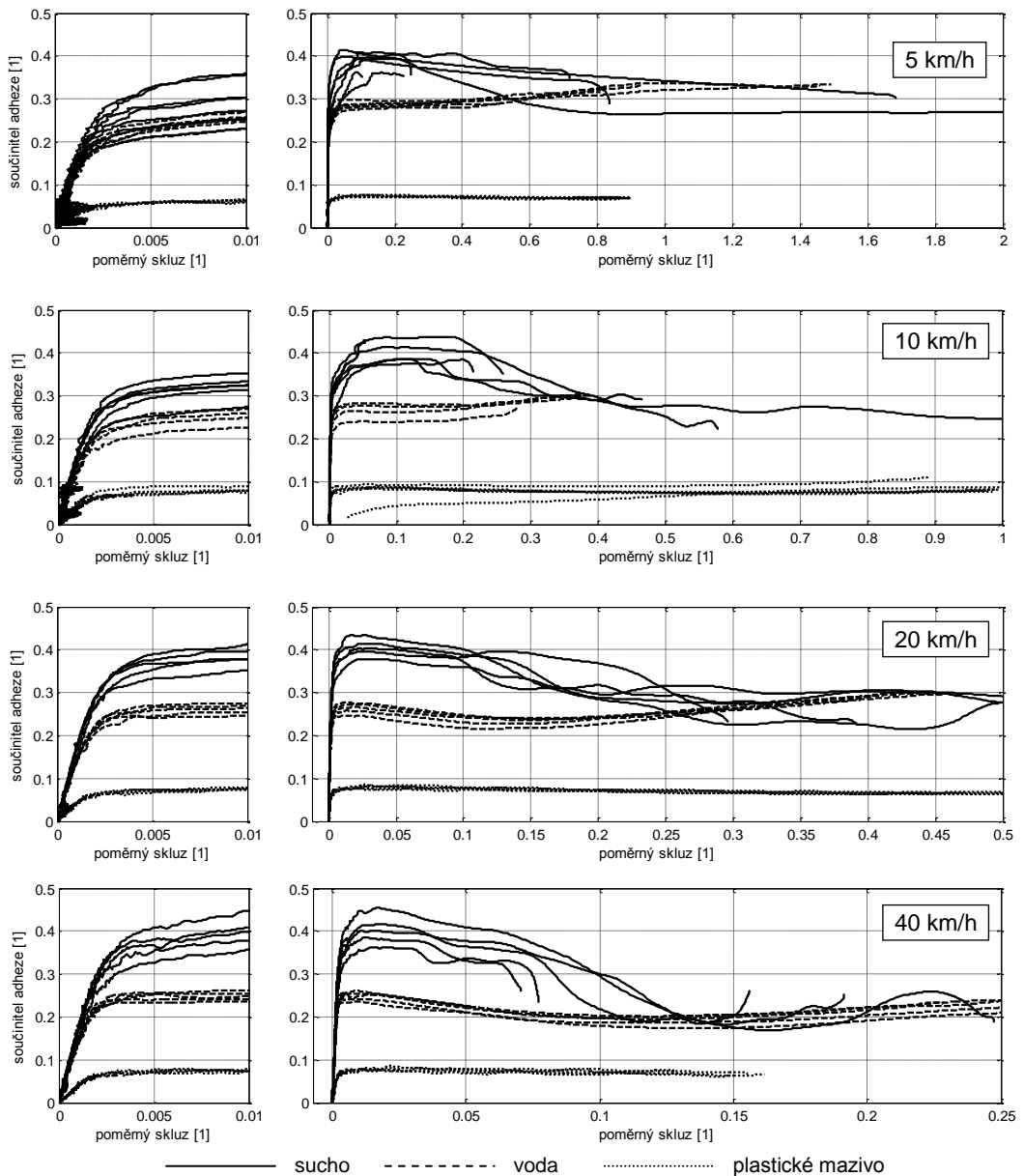
5 ZÁVĚR

Výhodou laboratorního zkušebního zařízení systému kolo–kolejnice v plném měřítku je, že lze na něm dobře řídit podmínky experimentu, a současně se přiblížit kontaktním podmínkám na skutečném vozidle. Vybavení, které má Dopravní fakulta Jana Pernera k dispozici, je proto udržováno a rozšiřováno. Byl popsán způsob bezdemontážní reprofilace zkušebních těles a možnosti ovlivňování adhezních podmínek. Pro efektivitu experimentální činnosti má značný přínos nový měřicí a řídicí software, díky němuž má obsluha v reálném čase přehled o probíhajících jevech. Automatizované zásahy do ovládání motoru kola přispívají k pohodlí obsluhy, opakovatelnosti experimentů a omezují riziko poškození jízdních ploch nadměrným prokluzem. Příštím krokem v rozvoji metodiky experimentální činnosti bude jednak využití zpětné vazby v regulaci motoru kola, jednak další usnadnění zpracování naměřených dat, jejich ukládání, analýzy a prezentace.

Na laboratorním zkušebním stavu byly v uplynulých letech úspěšně řešeny mimo jiné experimentální úlohy tří výzkumných projektů ve spolupráci s partnery z Velké Británie a Rakouska, a počítá se s dalším využitím.

Z výsledků adhezních experimentů byly vybrány naměřené adhezní charakteristiky pro podmínky suchých, mokrých a mazaných jízdních ploch. Ukázalo se zejména, že ač pokles celkové úrovně adheze je obecně spojen s poklesem počáteční strmosti adhezní charakteristiky, nemusí se to tak uplatnit vždy – zhoršení adheze čistou vodou ovlivní strmost jen ve velmi malé míře. Další směr výzkumu v této oblasti jednoznačně vede ke studiu pokročilých fyzikálních modelů adheze a tření, jaké jsou prezentovány např. v [13, 14].

Výzkum byl podporován Technologickou agenturou České republiky v rámci projektu TE01020038 Centrum kompetence drážních vozidel (CKDV).



Obr. 7 Zaznamenané adhezní charakteristiky $\mu = f(s)$ pro jednotlivé úrovně rychlosti; rozsah vodorovné osy na celkových grafech vpravo je nastaven tak, že ve všech případech odpovídá skluzové rychlosti $w = 0-10$ km/h



Literatura

[1] CARTER, F. W. On the Action of a Locomotive Driving Wheel. In *Proceedings of the Royal Society, Ser. A*, Vol. 112 (1926), s. 151–157.
 [2] KALKER, J. J. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. ISBN 0-7923-0712-7.

- [3] FREIBAUER, L. Adheze kola vozidla na dráze. In *7. vedecká konferencia Vysokej školy dopravy a spojov v Žiline – Zborník referátov*. Žilina: VŠDS Žilina, 1983, s. 214–219.
- [4] POLÁCH, O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. In *Wear*, 258 (2005), s. 992–1000.
- [5] VOLTR, P. Simulace podmínek kontaktu kola a kolejnice na zkušebních zařízeních. In *XXII. mezinárodní konferencia „Súčasný problémy v koľajových vozidlách“ – Zborník prednášok, diel II.* 16.–18.9.2015, Žilina. Žilina: Vedeckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite v Žiline, 2015. S. 299–306. ISBN 978-80-89276-49-3.
- [6] VOLTR, P., LATA, M., ČERNÝ, O. Measuring of wheel–rail adhesion characteristics at a test stand. In *Engineering Mechanics 2012 – Conference Proceedings* [CD]. May 14–19 2012, Svratka. Prague: Academy of Sciences of the Czech Republic, 2012. S. 1543–553. ISBN 978-80-86246-40-6.
- [7] CONTACT. *Vollebregt & Kalker's rolling and sliding contact model* [online]. URL: <http://kalkersoftware.org>. Cit. 18.4.2017.
- [8] VOLTR, P., LATA, M. Transient wheel-rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding. In *Vehicle System Dynamics*, Vol. 53 (2015), Issue 5, s. 605–618.
- [9] TRUMMER, G. et al. Wheel-rail creep force model for predicting water induced low adhesion phenomena. In *Tribology International*, 109 (2017), s. 409–415.
- [10] LATA, M., ČÁP, J. The steepness of the rising branch of adhesive characteristics between wheel and rail. In *Transport*, 2010, 25(1), s. 17–21.
- [11] BOSSO, N., ZAMPIERI, N. Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig. In *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51 (2013), Issue 4, s. 517–541.
- [12] ROVIRA, A. et al. Application of Fastsim with variable coefficient of friction using twin disc experimental measurements. In *Wear*, 274–275 (2012), s. 109–126.
- [13] HÄSE, P., MENTH, S. Kraftschluß bei Triebfahrzeugen – Modellbildung und Verifikation an Meßdaten. In *Elektrische Bahnen*, 94 (1996), No. 5, s. 125–134.
- [14] TOMBERGER, C. et al. Friction in wheel–rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. In *Wear*, 271 (2011), s. 2–12.